Aus der Klinik und Poliklinik für Mund-, Zahn- und Kieferkrankheiten der Universität Bonn.
Direktor: Prof. Dr. med. Proell.

Ermüdungs- und Erholungs-Erscheinungen des Stahls

im Hinblick auf das ärztlich-zahnärztliche Instrumentarium.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der zahnärztlichen Doktorwürde

der

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn.

Vorgelegt am 11. Februar 1937

von

Karl Lauer,

Zahnarzt

aus Duisburg-Hamborn.

Bonn 1937 / Buchdruckerei H. Trapp, Stiftsgasse 11.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität Bonn.

Referent: Professor Dr. Proell.

Korreferent: Professor Dr. Grebe.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsangabe.

A. Ermüdungserscheinungen an Metallen.
1. Bisherige Beobachtungen. S. 5
2. Theorien der Ermüdungs- und Erholungserscheinungen. S. 7
3. Struktureller Aufbau von Metallgittern. S. 10
4. Einwirkung von Belastung auf Gitter und Kristalle. S. 12
5. Wieweit ist die Frage gelöst und wieweit noch offen? S. 15

B. Eigene Versuche.
1. Wie sind Ermüdungs- und Erholungserscheinungen nachweisbar? Beschreibung der Apparatur. S. 18
2. Schnittmaterial und Klingen. S. 20
3. Tabellen der Schneidversuche. S. 22
4. Mikroskopische Beobachtungen. S. 26

C. Schlußfolgerung und Zusammenfassung. S. 29

Literaturverzeichnis. S. 30

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552321_0145

A. Ermüdungserscheinungen an Metallen.

1. Bisherige Beobachtungen.

In technischen Betrieben wurde schon lange Zeit beobachtet, daß Stähle häufig durch einen sonderbaren, anscheinend halb feinkristallinen, halb grobkristallinen Bruch unbrauchbar werden. Das hatte die Ansicht aufkommen lassen, auch Metalle „ermüden", d. h. sie verlieren ihre Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchungen durch innere Vorgänge. Es war weiterhin festgestellt worden, daß dieser „Dauerbruch" häufig durch Wechselbelastung herbeigeführt wurde.

Die Berliner Morgenpost brachte am 5. 3. 1931[1]) über die Schlafbedürftigkeit von Stahl und Metallen eine Notiz, die an Hand von Beobachtungen in den praktischen Betrieben Beweise für das Ruhebedürfnis der Metalle anführt. In England zeigte sich z. B. montags eine bessere Leitfähigkeit der Telegraphendrähte. Während des Sonntag, an dem die Telegraphenämter kaum in Anspruch genommen werden, hatten die Leitungen die Möglichkeit, sich auszuruhen. Wie genaue Messungen ergaben, war die Leitfähigkeit nach dem Ruhetag um 10% gestiegen.

Mechaniche Erschütterungen bewirken eine Ermüdung der Metalle. „Die Kurbelwelle eines Kraftwagens hat während ihrer durchschnittlichen Lebensdauer nicht weniger als 120 Millionen Anstöße zu überstehen, die durch die Überwindung der Totpunkte im Zylinder hervorgebracht werden. (Berechnung nach Ing. Rowlinson). Eine Turbinenschaufel hat, bis sie unbrauchbar wird, etwa 250 Milliarden Anstöße durch den gegen sie strömenden Dampf auszuhalten. Die Unruhe einer Uhr bewegt sich im Laufe des Jahres 150 Millionen mal hin und her."

Das sind staunenswerte Beanspruchungen an ein Werkstück. Ein plötzliches Versagen war bisher unerklärbar. Innere molekulare

1) Goldschmidt, Berl. Morgenpost vom 5. 3. 31.

Vorgänge sind, wir wir heute wissen, der Grund jener Erscheinungen. Durch Einschalten von Pausen suchte man die Lebensdauer von Werkstücken zu verlängern.

Eine gewisse Dauerfestigkeit ist den Metallen eigen. Sie kann und wird durch Poren und Fremdeinschlüsse, sowie durch Oberflächenfehler herabgesetzt.

Ist ein Stahlwerkstück mit Kerben versehen, so vermindert sich die Dauerfestigkeit naturgemäß. An der Kerbstelle tritt nämlich eine sogenannte Kerbempfindlichkeit bei Wechselbeanspruchung auf. Das trifft zu für fast alle in der Prothetik und Orthodontie verwendeten Klammern und Federn. Bei diesen haben wir es oft mit Legierungen zu tun. Die Kerbempfindlichkeit hängt von der Reinheit des Werkstoffes ab.

Richard Mailänder[2]) prüfte nach, ob legierte Stäbe mit Kerbempfindlichkeit bei Wechselbeanspruchung eine höhere Dauerfestigkeit besitzen als unlegierte.

Unter Wechselfestigkeit versteht K. Doever[3]) diejenige höchste Belastung, die ein Stab mindestens hundertmillionenmal aushält, ohne zu brechen.

Es ergab sich, daß die mittlere Kerbempfindlichkeit der Stähle stetig mit steigender Zugfestigkeit wächst, und daß dieser Einfluß größer ist, als der der Zusammensetzung der Stähle. Dabei „nimmt die durchschnittliche Wechselfestigkeit der Proben immer langsamer mit steigender Zugfestigkeit zu. Die Wechselfestigkeit nimmt innerhalb des untersuchten Zugfestigkeitsbereiches nicht wieder ab."

„Bei gleicher Zugfestigkeit ist die durchschnittliche Wechselfestigkeit polierter Proben für unlegierte und austenitische Stähle niedriger, als für die übrigen Stahlsorten." Im Gegensatz dazu ist die „durchschnittliche Wechselfestigkeit gekerbter Proben für unlegierte Stähle niedriger, für austenitische Stähle höher als für die übrigen Stahlsorten, die unter sich wieder keine wesentlichen Unterschiede zeigen."

2) Richard Mailänder, Kerbempfindlichkeit bei Wechselbeanspruchung von legierten und unlegierten Stählen. Stahl und Eisen 55¹, 39—42 (1935).
3) K. Doever, Stahl und Eisen 55¹, 41 (1935).

Unlegierte Stähle sind, wie Versuche bei gleicher Zugfestigkeit ergaben, „den anderen Stählen wie Mangan-, Silizium-, Nickel-, Chrom- und Chromnickelstählen in der absoluten Höhe der Dauerfestigkeit, sowohl für polierte, als auch für gekerbte Proben, unterlegen."

Stahl mit etwas stärkeren Seigerungen oder Einschlüssen zeigt beim Dauerbiegeversuch an Proben in Richtung der Schmiedefaser eine merklich höhere Kerbempfindlichkeit als an Proben quer zur Schmiedefaser. Die nicht gekerbten Querproben zeigen hierbei eine kleinere Wechselfestigkeit als die nicht gekerbten Längsproben, während in gekerbtem Zustand die Quer- und Längsproben etwa die gleiche Wechselfestigkeit haben.

Nach meinem Dafürhalten treffen alle vorhergenannten Gesichtspunkte für den Klammerstahl zu. Zugfestigkeit und Wechselfestigkeit müssen in einem bestimmten Verhältnis stehen. Demnach wirken sich die durch die Biegezangen hauptsächlich an der Klammerschulter gesetzten Kerben quer zur Klammerfaser infolge geringerer Wechselfestigkeit der Klammer ungünstig für den Sitz am Zahn aus.

Die Ermüdung erstmals und die daran anschließende Deformierung, d. h. in unserem Falle Überschreitung der Elastizitätsgrenze, setzt hier in vollster Auswirkung ein. Daher ist der oft zu beobachtende spätere schlechte Sitz der Klammer und der nachfolgende Bruch leicht erklärbar.

2. Theorien der Ermüdungs- und Erholungserscheinungen.

Jan G. Slater[4]) machte Versuche über die Erholung mittels Säuren gebeizter Proben durch Lagern bei verschiedenen Temperaturen (Raumtemperatur 50° und 100°). Die Versuche ergaben eine mit der Zeit und Temperatur parallel gehende Abnahme der Sprödigkeit bis zur Wiedererreichung des ursprünglichen Zustandes. Nach noch unveröffentlichten Untersuchungen an weichem Stahl, die im Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung,

4) J. G. Slater, Stahl und Eisen, 53, 1312 (1933).

Düsseldorf, durchgeführt wurden, hinterläßt das Beizen unter Bedingungen, bei denen die Probe nicht angegriffen wird, trotz ausreichender Lagerung und Wärmebehandlung eine dauernde mehr oder weniger bedeutende Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften.

Prof. G. Tammann[5]), Göttingen, gibt zu den Umwandlungen an den Legierungen und Stählen auf Grund von Beobachtungen im Jahre 1932 eine Erklärung, wonach sich alle Umwandlungen aus zwei einfachen Vorgängen zusammenzusetzen scheinen:

1. „einer Umordnung der Atome unter Erhaltung des Gitters,
2. einem Übergang in ein neues Gitter."

„Im ersten Fall tritt eine makroskopisch erkennbare Änderung des Gefüges überhaupt nicht ein, im letzten erfolgt die Umwandlung kristallographisch gesetzmäßig."

Soll „eine Verschiebung der Umwandlung" mittels tieferer Temperaturen „durch schnelles Abkühlen" erreicht werden, so kann die Änderung „in eine Reihe von Einzelvorgängen aufgespalten werden, die bis zu einem gewissen Grade unabhängig voneinander ablaufen". Es treten dabei „mit besonderen Eigenschaften behaftete Zwischenzustände auf".

Prof. Tammann erklärt sich die Erholung eines Werkstückes auf Grund atomarer Vorgänge. „Die Erholung verläuft bei den kubisch-flächenzentrierten Metallen einer Gruppe des periodischen Systems im engeren Sinne, Kupfer, Silber und Gold, ähnlich."

„Nickel, Palladium und Platin sind wiederum untereinander ähnlich, wenn auch von der ersten Gruppe deutlich verschieden."

In jüngster Zeit zeigten Beobachtungen des licht-elektrischen Effektes,[6]) daß Empfindlichkeitsänderungen im Photoeffekt dann auftreten, wenn das Material bestimmten Veränderungen unterliegt: z B. genügen geringe Oberflächenveränderungen, die durch Druck erzeugt werden, um merkliche Empfindlichkeitsschwankungen im Photoeffekt festzustellen.

---

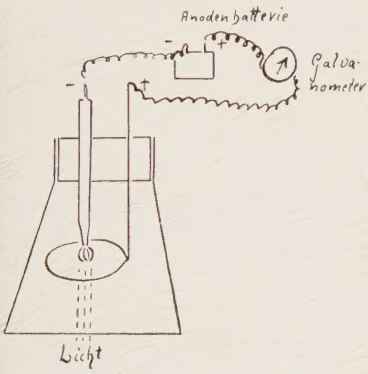
5) G. Tammann, Stahl und Eisen, 52, 814, (1932).
6) Grimsehl, Physik II. Bd. 2. Teil 109—114.

Im Folgenden will ich das Wesen des Photoeffektes kurz skizzieren und dann auf die Erklärung der Empfindlichkeitsänderung des Effektes eingehen, der eine Ermüdungserscheinung des Materials zugrunde liegt.

Der lichtelektrische Effekt, auch Photoeffekt oder Halwachs-Effekt genannt, lehrt, daß durch elektro-magnetische Wellen (= Licht) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 800—400\,\mu\mu$ und vornehmlich Wellen, kleiner als $400\,\mu\mu$ (ultraviolett) aus Metallen Elektronen herauslösen.

Besonders stark tritt der Photoeffekt bei Alkalimetallen auf.

Das Nachfolgende soll die Beschreibung einer Photozelle speziell für Stahlbohrer wiedergeben.



Ein Stahlborer wird in eine aus nebenstehender Zeichnung ersichtliche Photozelle eingebaut. Die Zelle besteht aus einem abgeschmolzenen Glas- oder Quarzgefäß, in dem sich der lichtempfindliche Bohrerkopf mit eingeschmolzener Zuleitung und die Gegenelektrode befinden. Das Quarzgefäß ist luftleer gepumpt und mit einem Edelgas gefüllt. Meist wird die Zelle mit einer äußeren Spannung betrieben. Die Energie stammt dann von der Spannungsquelle. Die Zelle dient nur als Steuerorgan. Der durch das Licht ausgelöste Elektronenstrom ist streng proportional der Lichtintensität und folgt selbst Lichtblitzen von $3 \cdot 10^{-9}$ sec Dauer momentan.

Der Kopf des Bohrers wird von einem von außen kommenden Lichtstrahl getroffen. Das Licht wandelt sich auf der Oberfläche des Stahls in elektrische Energie um. Der Stahlbohrer sendet Elektronen aus, die durch genügend hohe Spannung beschleunigt werden. Diese Elektronen strömen zur Anode. Bei beschleunigten Elektronen wird die Leitfähigkeit durch Stossionisation erhöht. Ein Ausschlag an einem angeschlossenen Galvanometer zeigt eine Veränderung der Stahloberfläche an.

Sollte ein Stahlwerkstück durch dauernde Belastung eine mikroskopisch unsichtbare Oberflächenbeschaffenheit aufweisen, so können doch Gasschichten an der Oberfläche oder im Innern absorbiert sein und die Metalleigenschaft verändern. Diese Veränderung wird als „Ermüdung" bezeichnet. Mittels des lichtelektrischen Effektes kann ein Stahlwerkstück vor und nach der Beanspruchung einen anderen Elektronenstrom hervorrufen, der zwar um 100 μ μ schwankend, einen Unterschied erkennen läßt.

3. Struktureller Aufbau von Metallgittern.

Ununterläßlich zur Erhärtung des Begriffes „Ermüdung und Erholung" ist die Vorstellung des inneren Gefügeaufbaues von Eisen und Stahl. Die unsichtbaren Veränderungen an den Raumgittern, die die Ursache der Ermüdung und Erholung darstellen, sind allein durch röntgenographische Aufnahmen errechenbar.

Die Stähle bestehen aus Kristallen in homogener oder heterogener Vereinigung je nach Zusatzmetallen. „Die kleinsten Bausteine der Kristalle sind in Raumgittern angeordnet." Davon unterscheidet man Molekül-, Atom- und Ionengitter. „Im allgemeinen lagern sich Kristallteilchen einer Lösung oder Schmelze verschiedener Substanzen ungeordnet aneinander."

Es vermögen jedoch zwei „Kristallarten geordnet aneinander" zu wachsen „oder besser gesagt: sie verwachsen orientiert, wenn die Dimensionen des Elementarbausteines in einer, zwei oder gar allen drei Richtungen übereinstimmen und, wenn zweitens in den betreffenden Richtungen gewisse Analogien in den chemischen Bindungen vorliegen."

„Entmischte Mischkristalle stellen eine besondere Art orientierter Verwachsungen dar." „Hierbei zerfallen teilweise oder ganz die bei hoher Temperatur gebildeten homogenen Mischkristalle."

Kristallgittertypen, wie sie in Stählen vorkommen, stellt „Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie" (1936) als kubisch flächenzentriert bei γ-Fe dar.

Cu-Typ

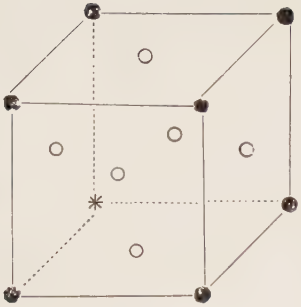


Abb. 2.

Dieses Gitterbild ist für γ-Fe, Ca, Al, Ni, Au, Ag und Cu der gleiche Typ.

Der Abstand a_w für das „Würgitter" beträgt a_w = 3,61 Å-E.[7¹])

Vor allem das als Mineral vorkommende α-Eisen zeigt sich als kubisch innenzentriert. Hierher gehören Li, Na, K, Cr.

W-Typ

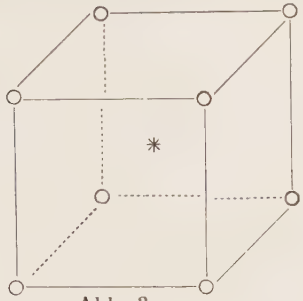


Abb. 3.

Bei Wolfram ist der Abstand $a_{w'}$ = 3,15 Å — E. 7[2])

Da den Stählen ein gewisser Prozentsatz von Kohlenstoff beigesellt ist, (er schwankt zwischen 0,6—1,7 %) und sich danach Härte und Festigkeit richten, interessiert uns ferner ein reines Kohlenstoffgitter. Diamant und Graphit stellen C-Gittertypen dar. „Der Diamanttyp ist deutbar als zwei ineinandergestellte, gegeneinander um $^1/_4$ a, $^1/_4$ a, $^1/_4$ a verschobene flächenzentrierte Gitter.

Bei Diamant ist a_w = 3,55 Å — E."

Je nach Entfernung der Atome voneinander läßt sich das Gitter einmal leichter spalten, das andere Mal entsprechend leichter verschieben. Auf der Verschieblichkeit beruht die Fe-

7¹ u. 7²) Klockmann's Lehrbuch der Mineralogie, 100—137 (1936).

stigkeit eines Gitters. Sind die Abstände der Nachbaratome klein, so ist die Festigkeit erhöht und der Kristall schwerer spaltbar, als wenn durch größere Atomabstände er außerordentlich leicht spaltbar und infolgedessen auf Translationsebenen verschiebbar ist.

Das Beispiel eines Schichtgitters bietet Graphit. Als C ist er dem Stahl ein unerläßliches Zusatzelement.

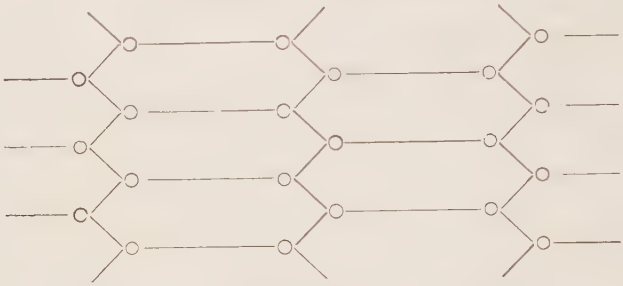


Abb. 4.

Die Entfernung der Nachbaratome beträgt beim Graphitgitter winzige millionste Millimeter, z. B. 2,7 Å — E bis zu 6,80 Å — E.

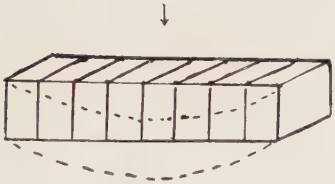
4. Einwirkung von Belastung auf Gitter und Kristalle.

Die Ermüdungserscheinungen an einem Stahlwerkstück äußern sich, wie in Folgendem erklärt werden soll, in einer Veränderung des inneren Gefügeaufbaues. Diese Veränderung setzt die Qualität des Werkstückes herab, ohne daß eine sichtbare Quantitätsveränderung eintritt.

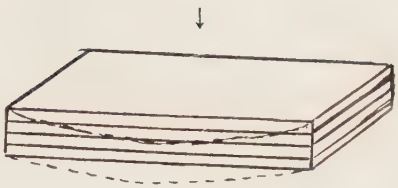
„Es lassen sich bei ein- oder wechselseitiger Beanspruchung an vielen einzelnen Stahlkristallen Teile ohne Trennung verschieben. Jene Kristallteile „gleiten" auf sogenannten „Gleitflächen"."

„Diese Erscheinung ist die den Metallen eigentümliche Art der plastischen Verformung."

An Hand eines durch Gewichte belasteten Teicheises, das aus einem Aggregat von Eiskristallen gleicher Dicke besteht, sollen die zwei verschiedenen Arten der Gleitungen erklärt werden.



Starkes Gleiten.
Abb. 5.



Geringes Gleiten.
Abb. 6.

Bei Abb. 5 „ist der Betrag der Verschiebung beliebig. Er ist abhängig von der Stärke und Dauer der Einwirkung." Diese Form des aneinander Vorbeigleitens wird „Translation" genannt.

Abb. 6. „Der verschobene Kristall steht zum ursprünglichen in Zwillingsstellung = Zwillingsgleitung oder „einfache Schiebung"."

Für fast alle „Gleitzwillinge sehr charakteristisch ist das Auftreten von zahlreichen, feinen „polysynthetischen" Lamellen." Die Bearbeitbarkeit beruht bei Eisen, im Gegensatz zu anderen Metallen, auf „einfacher Schiebung". „Es können zwölf Lamellensysteme gleichzeitig auftreten. Daher ist die Verformbarkeit bei beliebiger Beanspruchung sehr groß."

„Wenn die Beanspruchung und Belastung aufgehört hat, wäre es theoretisch denkbar, daß die Translation ein völlig ungestörtes Gitter" hinterläßt. Es entstehen jedoch innere Störungsstellen. Das besonders, wenn Translationen und Gleitungen gleichzeitig nach mehreren Richtungen hin erfolgen. So entstehen „gestörte Gitter". Der Kristall sucht die Störung durch Rekristallisation zu beseitigen. Das zeigen besonders die Metalle". In dieser Rekristallisation beruht, wie wir annehmen, die Erholung eines Werkstückes. Denn das Rückordnen des Kristalls in seine alte Form ermöglicht dem Werkstück, die ursprüngliche Form wiederzuerhalten.

Die in der Prothetik zur Verwendung gelangenden „V2A" Stahlkammern vermögen eine beträchtliche Schwingungsanzahl auszuhalten. Die Anzahl der Schwingungen schwankt, bis der Bruch eintritt, je nach der Höhe der Beanspruchung zwischen 1

Abb. 5 und 6 entnommen: Klockmann's Lehrbuch der Mineralogie.

und unendlich, wie Krupp-Essen angibt. Da diese Stahlart gegen Säuren beständig ist, dürfte eine „V2A“ Klammer nicht durch Korrosionserscheinungen, sondern durch dauernde Wechselbelastung brechen. Die Möglichkeit des Bruches liegt in der Vorbehandlung des Klammerdrahtes beim Biegen, wie auch bei der späteren durch den Kaudruck ausgelösten Beanspruchung.

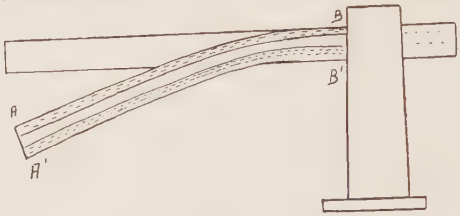


Abb. 7.

Die obige Abbildung zeigt die Kompressibilität des Drahtes bei der Strecke A' B', die eine dem Druck entgegengesetzte Zone mit Verdichtung der Raumgitter darstellt. Die Strecke AB hingegen weist eine Dehnung der Gitter auf.

Haben die Kristallarten nun bei ständiger Wechselbelastung nicht die Möglichkeit, sich zu orientieren, so tritt an der Stelle der größten Dehnung innerhalb der Raumgitter ein „innerer Bruch“ auf.

Der Bruch folgt zwangsläufig auf die Verschiebung der Raumgitter mit Überdehnung des Gittergefüges.

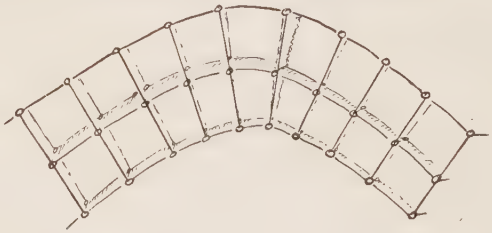


Abb. 8.
Darstellung eines überdehnten Gitters.

Eine Ermüdung geht dem Bruch voraus, weil eine Umordnung der Kristalle in ihrem Gitteraufbau bestand.

Der Bruch tritt ein, wenn den Kristallen nicht Zeit zur Rekristallisation gelassen wird. Mit der Rekristallisation würde das „gestörte Gitter“ in die alte Form zurücktreten, dem Stahl dadurch die Erholung ermöglicht.

5. Wieweit ist die Frage gelöst und wieweit noch offen?

Dankwart Schenk[8]) untersuchte Ermüdungserscheinungen von Stahlstäben an Hand ihrer Dämpfungsänderung. „An zwei Stäben wurde beobachtet, daß das Dämpfungsdekrement keine konstante Größe ist, sondern sich mit der Amplitude ändert.“ Amplitude gleich Schwingungsweite. Als Dekrement wird der Quotient zweier benachbarter Amplituden bezeichnet.

„Bei längerer Behandlung verloren die beiden untersuchten Stäbe ihre Schwingungsfähigkeit. Durch Röntgenanalyse konnte nachgewiesen werden, daß die Dämpfungsänderung mit einer Strukturänderung verbunden ist.“

Wenn die Dämpfungsänderung infolge der Ermüdung des schwingenden Stabes eintrat, nachträglich eine Strukturänderung nachgewiesen wurde, so kann wohl behauptet werden, daß durch die Strukturänderung die „Ermüdung des Stahles“ begründet ist. Folglich ist die Zunahme des Dämpfungsdekrementes beim schwingenden Stab ein Maß für die Ermüdung des Materials. „Eine Änderung der Abhängigkeit der Dämpfung von der Amplitude kann ein Anzeichen für die Änderung der Metallstruktur sein.“

Dankwart Schenk wies innere Veränderungen mittels Röntgenanalyse nach. Der ganze Stab „wurde in einer Aufnahmekammer so justiert, daß ein ausgeblendeter Röntgenstrahl Kristallbilder lieferte“.

„Wurde der Stab längere Zeit (z. B. 20 Stunden) zu stärkeren Biegungsschwingungen angeregt, so ließ sich hernach bei den Röntgenaufnahmen des Auftreten neuer Interferenzbilder feststellen.“

8) Dankwart Schenk, Z. f. Phys. 72 54—67 (1931).

Prof. Franz Wever und Hermann Möller[9]) wiesen innere Spannungen in einem gebogenen Flußstahlblech nach. Die in dem Stahlblech vorhandenen, verborgenen Spannungen sind elastisch. Sie haben elastische Dehnungen des Kristallgitters zur Folge. Nachweisbar werden sie, wenn es gelingt, „die Genauigkeit der röntgenographischen Gittermessung auf eine ausreichende Höhe zu bringen."

„Spannungen von 1 kg/mm² bei Stahlwerkstücken bewirken nur Dehnungen von $5 \cdot 10^{-5}$ in der Größenordnung."

„Das Eisen ist kubisch in der Gitteranordnung.„ „An einer freien Oberfläche eines Werkstücks bestehen nur zweiachsige Spannungszustände, bei denen die Hauptspannungen σ_1, σ_2 in der Oberfläche liegen."

Prof. Wever und H. Möller führten einachsige Spannungszustände von bekanntem Betrage herbei. Die damit verbundenen Dehnungen wurden röntgenographisch gemessen.

Bei Biegung eines Blechstreifens nach dem Vorbild von Sachs und Weerts entsteht im Bereich elastischer Formänderung ein praktisch einachsiger Spannungszustand und eine Hauptdehnung.

„Die gemessenen Gitterparameter" liefern bei elastischer Formänderung ein Dehnungsschaubild. „Die Spannungen sind durch die von ihnen verursachten elastischen Gitteränderungen gemessen."

„Nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze verliert die Beziehung ihre Gültigkeit."

Die in der Arbeit von Prof. Wever und H. Möller aufgeführten Tabellen zeigen Gitteränderungen bei einem geglühten Flußstahlblech, das bei 950° geglüht und langsam abgekühlt wurde.

„Ein ungeglühter Streifen gleicher Blechprobe, der abwechselnd gebogen und entlastet wurde, zeigt, daß nach einer Verformung von 3 mm der Streifen vollständig entlastet wurde und eine Durchbiegung von 0,3 mm zurückblieb."

9) Prof. Wever und H. Möller, Über ein Verfahren und Nachweis innerer Spannungen, Archiv für das Eisenhüttenwesen 5, 215—218 (1931—1932)

Wenn der Streifen weiter bis auf 5 mm durchgebogen wurde, wies das Gitterparameter „entsprechende Schwankungen für die Überschreitung der Streckgrenze“ auf.

Die Arbeit von Prof. Wever und H. Möller weist nach, wie einflußreich die Durchbiegung des Klammerstahls in der Prothetik ist.

Was für das Fluß-Stahlblech gilt, bezieht sich in ähnlicher Weise auf unsere halbrunden Klammern und auf die Schlaufenklammern. Es ist falsch, eine Klammer zu großer Beanspruchung auszusetzen, da bei Durchbiegungen die Elementarwürfelkanten mit steigender Dehnung stetig weiter auseinander gerückt werden. So läßt sich durch das Wechselspiel der Dehnung und der Rückführung in die alte Form die Ermüdungserscheinung eines Werkstücks erklären.

Die angeführte Tabelle weist nach, daß bei einer bleibenden Durchbiegung von 2,4 mm die Elementarwürfelkante für die Vorderseite des Bleches um 0,0003 Å—E im Gegensatz zur Durchbiegung um 0 mm bestehen bleibt, somit die Ermüdung anhielt bei allen der Biegung unterworfenen Metallen, wenn diese nicht in ihrem Kristallaufbau das Bestreben der Rekristallisation besäßen. Diese Rekristallisation weist spätere Erholungserscheinungen nach.

Die Frage der Ermüdungs- und Erholungserscheinungen dürfte nach all dem Vorhergesagten als gelöst erscheinen. Jene inneren Vorgänge, die sich auf jedes der Belastung ausgesetzte Werkstück erstrecken, wirken sich auf schwingende, rotierende und letzthin auch schneidende Werkstücke aus.

„Ermüdungserscheinungen von Zahnbohrern“ werden dahingehend beantwortet, daß es dieses bei zahnärztlichen Bohrmaschinen-Instrumenten nicht gibt. Man stellte nur einen Verschleiß fest, d. h. nach häufigem Gebrauch werden die Bohrer stumpf und unbrauchbar.[10])

10) Briefwechsel mit Firma Hager & Meisinger, Düsseldorf, November 1936.

Daß es eine Ermüdung von Messerkanten gibt, will ich mit eigenen Versuchen beweisen.

Da die Bohrer kleine, scharfe Messerbündel darstellen, kann man erwarten, daß die Ergebnisse für die Messeruntersuchungen auch bei Bohrern sich zeitigen.

B. Eigene Versuche.

1. Wie sind Ermüdungs- und Erholungserscheinungen makroskopisch nachweisbar?

Wenn eine Ermüdung des Stahls an irgend einem Werkstück eintritt, so muß sich diese Erscheinung auf die schmale Kante eines Messers, z. B. auf eine Rasierklinge, ebenfalls auswirken. Bei Schneidversuchen soll die Möglichkeit der Abnahme der Schneidschärfe, wie auch die der späteren Wiedergewinnung = Erholung nachweisbar gemacht werden.

Zu berücksichtigen ist, daß der Stahl an der Schneidkante nicht dem Verschleiß im Sinne der Abnutzung unterworfen wird. Falls jedoch eine Abnutzung eintreten sollte, wäre nachzuprüfen inwieweit die Abnutzung mit der Ermüdungserscheinung einherläuft, d. h. die Schneidfähigkeit kontinuierlich nachläßt.

Nach festgestellter Ermüdung der Klinge, die der Abnutzung unterlag, soll ferner eine Erholung im Abnutzungsbereich nachgewiesen werden.

Es tauchen die Fragen auf:
Wie soll eine Klinge mittels einer geeigneten Apparatur gleichmäßig und an ein und derselben Stelle durchtrennen? Wie kann der Unterschied einer früheren und einer späteren Durchtrennung des gleichen Materials nachgewiesen werden?

Welche Ansprüche sind an das zu durchschneidende Material zu stellen?

Die Zeichnung (Abb. 9) gibt die von mir konstruierte Schneidapparatur wieder. Auf einem geraden Sperrholzbrett ist aufmontiert der Support S, der die Klinge mittels der Klemmschraube Ks in Vertikalstellung hält. Der Support ist auf einer Messingplatte

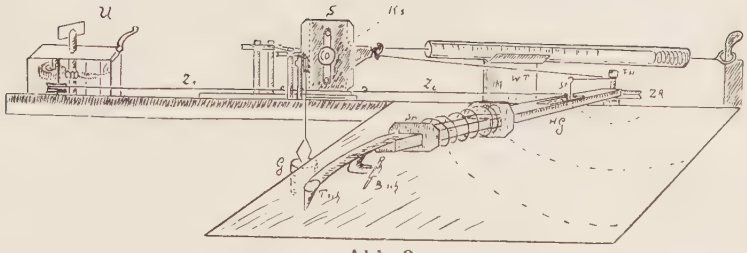


Abb. 9

mit leichter Federgleitung verschieblich. Gleichmäßig wird der Support, an dessen vorderen Zughaken H ein Zugfaden Z_1 mit einem Uhrwerk U verbunden ist, mit der unbeweglichen, festgeklemmten Klinge vorangezogen. Z_1 umschlingt unterhalb des Uhrwerkes eine Rolle mit Friktion, die bei zurückschieben des Supportes den Zugfaden wieder entrollt. Am Uhrwerk ist eine Anlaß- und Stoppvorrichtung angebracht.

Der Support trägt ferner einen Waaghalter. Daran wird das bewegliche Ende einer von Prof. Maey konstruierten Federwaage eingehängt. Die mit einer Skala in $^1/_{10}$ g Einteilung versehene Federwaage ruht auf dem Waagträger WT. Das Ende der Waage umfaßt mit einem Ring den zweiten Waaghalter.

Der Support mit der Klinge rückt bei Anlassung des Uhrwerkes vor. Dabei zieht das Uhrwerk gleichzeitig die Waage an. Der Weg, den die Klinge zurücklegt, wird in Gramm ausgedrückt.

Um einmal die Ungenauigkeit manueller Stoppung auszuschalten, das andere Mal eine größere Skalenbreite, die Messungen bis zu 1000stel Gramm ermöglicht, zu erzielen, verbindet ein hinterer Zugfaden Z_2 den Support mit einer rotierenden, horizontal gelagerten Scheibe = Zeigerrad ZR. Dieses ist an seiner Peripherie gerillt.

Der Zugfaden Z_2 läuft in der Rille. Er ist am unteren Rillenrand befestigt.

Ein Hohlgeschiebe HG geht vom Zeigerrad aus. Es stellt einen Zeiger dar, der einen Tintenschreiber Tsch und einen Bleistiftschreiber Bsch trägt. Die Schreiber werden durch Federn auf eine Skala leicht aufgedrückt. Der massive vierkantige Teil des Geschiebes, wie auch das vierkantige Geschieberohr be-

sitzen je ein Sperrblech Sp. Dazwischen liegt eine Feder. Im letzten Drittel des Hohlrohres, dem Zeigerrad zugewendet, ragt ein Stifthaken St hervor. Er ist an dem Geschiebevierkant befestigt. Da das Hohlrohr, eine Strecke von 2 cm etwa, geschlitzt ist, hat der Stifthaken die Möglichkeit, mit seiner Unterlage zu gleiten.

Ein aus pflanzlichen Fasern gewirkter Faden, oder ein Roßhaar, werden durch eine Schlinge an dem Stifthaken befestigt. Der Faden läuft um einen Fadenhalter FH zu vier Rollen. Das Fadenende trägt ein freischwebendes Gewicht G. Das Gewicht spannt den Faden. Es zieht gleichzeitig die Feder am Hohlgeschiebe zusammen. Durchschneidet die Klinge den Faden, so schnellt im gleichen Augenblick die Feder zurück. Der Schreiber zeigt die Schnittstelle auf der Skala an, die sich von der sonstigen Kreiskurve durch einen Ausschlag kenntlich macht. Dadurch wird eine exakte Aufzeichnung der Schnitte mechanisch ausgelöst. Ein ungenaues Anhalten des Uhrwerkes, um die Schnittstellen festzulegen, wird damit ausgeschaltet.

2. Schnittmaterial und Klingen.

Voraussetzung für eine genaue Aufeinanderfolge der Schnitte ist die Gleichmäßigkeit des Schnittmaterials. Rein oberflächlich betrachtet, kann ein gleichdicker Faden, der sich aus pflanzlichen Fasern zusammensetzt, den Schnittanforderungen genügen. Zwar muß die Geschwindigkeit, mit der der Faden durchtrennt wird, so groß sein, daß er sich nicht entrollen kann.

Ein Nähgarnfaden wurde als eine erste Lösung dieser Überlegung angewendet. Darauf wurde Roßhaar, von 50 cm Länge etwa, zu den Schneidversuchen herangezogen. Es nähert sich, in seinem strukturellen Aufbau, aus tierischen Zellen zusammengesetzt, dem menschlichen Haar, wenngleich entschieden größeren Durchmessers.

Mikroskopisch betrachtet weist der Nähgarnfaden unregelmäßige Struktur auf. Kleine Pflanzenfäserchen stehen vom Hauptstrang ab. Eine stellenweise Verdichtung bedingt innerhalb der Schnittfolge einen weiter gelagerten Schnittpunkt auf der Kurven-

skala. Hierin liegt eine Fehlerquelle für die Aufeinanderfolge der Schnitte.

Reiner, im strukturellen Aufbau einheitlicher, ist das Roßhaar. Es bestehen bei ihm auch Verdichtungen, zwar dort, wo die Zellen aneinandergrenzen. Ebenfalls eine Fehlerquelle für die Schnittfolgen.

Faserige Unregelmäßigkeiten wie beim Nähgarnfaden sind nicht vorhanden. Hinzu kommt, daß das Roßhaar der Schneide einen großen Widerstand entgegensetzt bei gleichem Zug des Gewichtes, infolge seiner geringen Kompressibilität. Diese wirkt sich auf die Schneide zur Feststellung der Ermüdung und Erholung günstig aus. Somit wird mit möglichster Sicherheit immer ein und dieselbe Stelle der Klinge getroffen und belastet.

Das benutzte Gewicht, das den Faden bzw. das Haar strafft, ist für alle Schnitte das gleiche. Zur Durchführung der Messungen genügten 150 g.

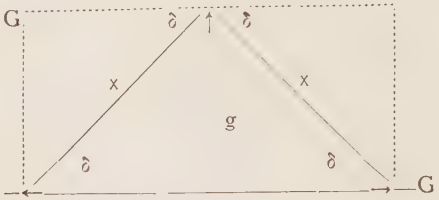
Als Klingen wurden speziell ROTBART Be-Be Klingen verwandt. Diese sollen, wie die Firma mitteilte, aus einem guten deutschen Stahl hergestellt sein.[11])

Jede Klinge konnte für zwei Untersuchungen verwertet werden. Sie lag ohne Beschädigung ihrer Kante der Supportwand an. Die Rollen, über die der Faden lief, waren nicht verstellbar. Dadurch blieb eine Verschiebung des Fadens zu einer unbenutzten Klingenstelle ausgeschaltet.

Die Zugkraft im Faden beträgt 150 g. Die Schubkraft der Klinge wird angezeigt durch die Federwaage. Schubkraft = Schneidekraft. Je nach der Schubkraft des Messers verändert sich der Winkel, den der Faden mit der Ausgangsstellung bildet. Die Zugkraft bleibt gleichmäßig wirksam, wie sich aus folgender Berechnung ergibt, bei der die Schubkraft in Abhängigkeit von der Zugkraft und dem Fadenwinkel ausgedrückt ist.

11) Briefwechsel mit der Firma Roth-Büchner, Berlin im Januar 1936.

Es sei die Fadenspannkraft gleich G. Die Schubkraft = g. Der Fadenwinkel =



$$x^2 = g^2 + G^2; \quad g = x^2 - G^2$$

$$\sin \delta = \frac{g}{x}; \qquad x = \frac{g}{\sin \delta}$$

$$\cos \delta = \frac{G}{x}; \qquad x = \frac{G}{\cos \delta}$$

$$g = \frac{G \cdot \sin \delta}{\cos \delta}$$

$$g = G \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

Die Schnittkraft g ist proportional der Durchbiegung des Fadens, wie die Formel sagt, und unabhängig von der Spannkraft des Fadens.

3. Tabellen und Kurven der Schneidversuche.

Bei der oben angeführten Zug- und Schubkraft (durchtrennt) die Messerschneide den Nähgarnfaden im Bereich von 0,5 bis 2 g.

Durch eine große Zahl von Messungen und Mittelwertbildungen konnten etwa auftretende Unregelmäßigkeiten in der Schnittfolge aufgehoben werden. Die Ursache der unregelmäßigen Schnittfolge liegt in der Beschaffenheit des Fadens, in der Härte des Stahls und in dem Schliff der Schneide.

Der Nähgarnfaden, mit dem die Messungen durchgeführt wurden, hat eine durchschnittliche Dicke von $^{14}/_{100}$ mm. Das Roßhaar ist von gleicher Dicke. Die Dickenschwankungen machen bei beiden $^{2}/_{100}$ mm aus.

Angabe der Schnittfolgen relativ zur Schneidekraft bei Nähgarn.

	1. Beanspruchungsreihe					2. Beanspruchungsreihe				
Klinge Nr.	Schnittfolgen und Ermüdung					Schnittfolgen nach Erholung			Std.	10 Sec. erhitzt auf 100° C.
1	1	2	3	4	5	2	1	3	22	—
2	1	2	3	4	5	1	3	2	24	—
						3	1	2	26	—
3	1	2	3	5	4	2	3	1	—	„
4	1	2	3	4	5	1	3		15	—
						1	2	3	—	„
5	2	3	4	1	5	1	2	3	15	—
6	1	3	2	5	4	1	2	3	24	—
7	2	1	4	5	3	3	1	2	120	—
Durchschnitt:	1,28	2,14	3,14	4	6,2	1,66	2	2,37		

Tabelle 1.

Bei der Tab. 1 entspricht die Stellung der Zahlen in horizontaler Reihe von links nach rechts einer zunehmenden Schneidekraft. Die Zahlen selbst bedeuten die Reihe hintereinander ausgeführter Schnitte.

In folgendem extremen Beispiel besagt bei Klinge Nr. 7, 2 1 4 5 3, daß für den zweiten Schnitt eine geringere Schneidekraft nötig war, als beim ersten Schnitt usw.

Rubrik „Ermüdung“ gibt die Schnittfolgen bei der ersten Beanspruchungsreihe der Klingen wieder, Rubrik „Erholung“ die Schnittfolgen bei einer zweiten Beanspruchungsreihe nach einer gewissen Erholungszeit, die in Stunden gemessen wurde.

Erholung nach Sekunden trat nur auf, wenn die Klinge auf ca. 100° erhitzt wurde in kochendem Wasser 10 sec. lang.

Die Durchschnittswerte der Messungen lehren, daß mit zunehmender Schnittzahl die Schneidkraft vergrößert werden muß, d. h. daß die Klinge ermüdet.

Auch nach der Erholung ermüdet die Klinge, wie die Durchschnittswerte zeigen. Jedoch liegen die ersten Schnittkraftwerte der zweiten Beanspruchungsreihe vor den letzten der ersten Beanspruchungsreihe, d. h. die Klinge hatte sich nach einer Lagezeit erholt.

Nach der Erholung konnten in der Regel nur drei Messungen gemacht werden, da weitere Meßwerte den maximalen Ermüdungsschnittkraftwert überstiegen.

In der folgenden Tab. 2 ist die Anordnung analog zu Tab. 1.

Angabe der Schnittfolgen relativ zur Schneidekraft bei Rosshaar.

	1. Beanspruchungsreihe	2. Beanspruchungsreihe		
Klinge Nr.	Schnittfolgen und Ermüdung	Schnittfolgen nach Erholung	Std.	10 Sec. erhitzt auf 100° C.
1	1 2 3 4	1 2	—	„
2	3 2 1 4 5	1 2	24	—
3	1 4 3 2	1 2	24	—
4	3 2 4 5 1	1 2 3	48	—
5	1 3 4 2	1 4 3 2	48	—
6	2 4 3 1	1 2 3	24	—
7	3 2 4 5 1	2 1 3	24	—
Durchschnitt:	2 2,71 3,14 3,28	1,14 2,14 (3)		

Tabelle 2.

In den folgenden Tabellen 3, 4 und 5, die die Schnittfolgen mit absoluten Grammwerten angeben, werden die Vergleiche der Messungen vor und nach der Erholung noch besser sichtlich.

Der Schreiber der Apparatur legt die einzelnen Schnitte auf der Skalenkurve fest. Dadurch wird die Grammeinteilung der Federwaage in Grad ausgedrückt.

$1^0 = 0{,}0211$ g.

Schnitte und Ermüdung			Schnitte nach Erholung v. 48 Std.		
Schnitt Nr.	Skalenwinkel in Grad	Schnittkraft in Gramm	Schnitt Nr.	Skalenwinkel in Grad	Schnittkraft in Gramm
1	24,6°	0,518	1	45°	0,949
2	38,5°	0,811	2	50°	1,054
3	25,9°	0,547	3	54°	1,139
4	31,2°	0,658	4	(47,2°)	(0,996)
5	51,8°	1,092	5	69,5°	1,466
6	55°	1,159			

Tabelle 3.

Schnitte und Ermüdung			Schnitte nach Erholung v. 24 Std.		
Schnitt Nr.	Skalenwinkel in Grad	Schnittkraft in Gramm	Schnitt Nr.	Skalenwinkel in Grad	Schnittkraft in Gramm
1	48°	1,030	1	46°	0,97
2	43,2°	0,911	2	47,5°	1,01
3	40,5°	0,855	3	65,5°	1,37
4	51°	1,075			
5	54,8°	1,157			

Tabelle 4.

Schnitte und Ermüdung			Schnitte nach Erholung durch Erhitzen (10 Sec. 100° C.)		
Schnitt Nr.	Skalenwinkel in Grad	Schnittkraft in Gramm	Schnitt Nr.	Skalenwinkel in Grad	Schnittkraft in Gramm
1	39,1°	0,824	1	81,8°	1,722
2	55,2°	1,164	2	101°	2,128
3	99,5°	2,100	3	110°	2,320
4	104°	2,145			

Tabelle 5.

4. Mikroskopische Beobachtungen.

Im mikroskopischen Bild zeichnet sich die Klinge durch senkrechte Schliffasern an der Schneide vom übrigen Klingente i ab. Wie aus den Abb. 10 und 11 ersichtlich, weist die Klinge eine gleichmäßig verlaufende, scharfe Schneide auf.

Kaum merklich sitzt dieser ein sogenannter „Klingenbart" an.

Die beiden Bilder stellen Mikrophotogramme dar. Die in Alkohol-Äther entfetteten Klingen geben das Bild in reflektiertem Licht wieder.

Durch den Fettaufstrich, der das Rosten der Klinge verhindern soll, bietet sich bei mikroskopischer Betrachtung eine mannigfaltige Linienführung und Konturenzeichnung auf der Schneide.

Die schrägen Linien durchkreuzen infolge verdichteter Fettauflagerung beim Glätten mit den Fingern die Schliffasern.

Bei Abbildung 12 wurde die Schneidkante untersucht, die bei zwei Schnittversuchen mit Nähgarn einen Bruch an der Stelle der Belastung erkennen läßt. Noch deutlicher zeigt sich jene Bruchstelle bei 15 Schnitten (Abb. 13).

Messungen mit einem Faden aus pflanzlichen Fasern wiesen durchweg Brucherscheinungen an der Kante der Schneide auf. Vorherige Tabelle gibt an, daß trotz des Bruches die belastete Stelle sich erholte.

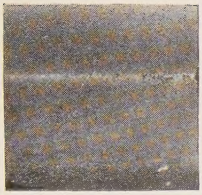


Abb. 10

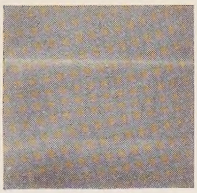


Abb. 11

Abb. 12

Abb. 13

Abb. 14

Abb. 15

Abb. 16

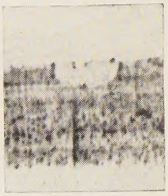


Abb. 17

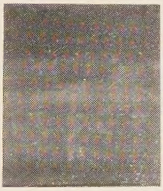


Abb. 18

Die Stahlkristalle, die der Translation durch die Druckbelastung unterworfen wurden, erholten sich nach angegebenen Zeiten, indem sie die „einfache Verschiebung" durch Rekristallisation in die ursprüngliche Lage wieder aufhoben.